




## 4.2 Blaupause 9: Bereitstellung von Momentanreserve aus Batteriespeichern und dezentralen Erzeugungsanlagen

Blaupause	
<b>Zielgruppen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Übertragungsnetzbetreiber</li> <li>■ Anlagenhersteller</li> </ul>
<b>Ausgangslage und Problemstellung</b>	<p>Die Massenträgheit der elektromechanischen Generatoren, auch Momentanreserve genannt, ist essenziell für die Stabilität der Frequenz und Begrenzung von Frequenzgradienten im Stromnetz. Perspektivisch muss Momentanreserve auch durch dezentrale Anlagen, EE-Anlagen und Speicher bereitgestellt werden. Hierfür muss entsprechendes Verhalten – die Leistungsanpassung als Folge von Frequenzschwankungen innerhalb sehr kurzer Zeit – in die Wechselrichter eingepreßt werden.</p>
<b>Lösungsansatz</b>	<p>In SINTEG wurde demonstriert, dass die Bereitstellung von Momentanreserve aus Batteriespeichern technisch realisierbar ist. Hierfür wurden entsprechende Regelalgorithmen in die Wechselrichter integriert und getestet. Dabei wurden verschiedene mögliche Spezifikationen der Systemdienstleistung Momentanreserve betrachtet.</p>
<b>Einordnung in Prozessschema der Flexplattformen</b>	<div style="text-align: center;"> <p><b>SDL für den gestörten Betrieb</b></p> <div style="border: 1px solid #00a0e3; padding: 10px; margin: 10px auto; width: 80%;"> <p style="text-align: center; color: #00a0e3;"><b>SDL für den ungestörten Betrieb</b></p> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin: 5px auto; width: 80%;"> <p style="text-align: center;"><b>Frequenzhaltung</b></p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin: 5px 0;"> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; width: 40%;">Regelleistung</div> <div style="border: 1px solid #00a0e3; padding: 5px; width: 40%; background-color: #e0f2f7;">Momentan-reserve</div> </div> </div> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin: 5px auto; width: 80%;"> <p style="text-align: center;"><b>Spannungshaltung</b></p> </div> <div style="border: 1px solid #ccc; padding: 5px; margin: 5px auto; width: 80%;"> <p style="text-align: center;"><b>Betriebsführung und Netzengpassmanagement</b></p> </div> </div> </div>
<b>Technologiereifegrad</b>	<div style="text-align: center; margin-bottom: 10px;"> <span style="border: 1px solid #00a0e3; padding: 2px 5px; margin: 0 5px;">1</span> <span style="border: 1px solid #00a0e3; padding: 2px 5px; margin: 0 5px;">2</span> <span style="border: 1px solid #00a0e3; padding: 2px 5px; margin: 0 5px;">3</span> <span style="border: 1px solid #00a0e3; padding: 2px 5px; margin: 0 5px; background-color: #00a0e3; color: white;">4</span> <span style="border: 1px solid #00a0e3; padding: 2px 5px; margin: 0 5px;">5</span> <span style="border: 1px solid #00a0e3; padding: 2px 5px; margin: 0 5px;">6</span> <span style="border: 1px solid #00a0e3; padding: 2px 5px; margin: 0 5px;">7</span> <span style="border: 1px solid #00a0e3; padding: 2px 5px; margin: 0 5px;">8</span> <span style="border: 1px solid #00a0e3; padding: 2px 5px; margin: 0 5px;">9</span> </div> <p>TRL 4 – 6: Von z. T. Generelle Funktion der Technologie/Verfahren/o. Ä. konnte im Labor/in einer Versuchsumgebung nachgewiesen werden bis zu z. T. Demonstartionsanlage/-konzept in anwendungsähnlicher Umgebung funktioniert.</p>
<b>Eingeflossene SINTEG-Aktivitäten</b>	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-start;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  <p style="font-size: 8px;">Norddeutsche Energiewende</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Speicherregelkraftwerk Curslack</li> <li>■ FATWAKE</li> </ul> </div> <div style="text-align: center;">  <p style="font-size: 8px;">Zukunftsspeicher Energiewende</p> </div> </div>
<b>Innovationsgehalt</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Aktivitäten in SINTEG knüpfen an internationale Forschung an; neue Regelalgorithmen konnten in SINTEG entwickelt und getestet werden; techn. Anforderungen an Anlagen wurden weiter spezifiziert.</li> </ul>
<b>Bedingungen für Übertragbarkeit und Skalierbarkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ In SINTEG demonstrierte Konzepte für die Wechselrichter-basierte Bereitstellung von Momentanreserve lassen sich auf vielfältige Anlagentypen übertragen.</li> <li>■ Skalierung erfordert Anpassung des regulatorischen Rahmens (nationale Spezifikation der technischen Anforderungen bzw. verbindliche Festlegung durch europäische Abstimmungsprozesse).</li> <li>■ Wegen aktuell fehlenden Bedarfs nur mittel- bis langfristige Übertragbarkeit/Skalierbarkeit.</li> </ul>

## PROBLEMSTELLUNG

Momentanreserve ist essenziell für die Stabilität der Frequenz im Normalbetrieb und die Begrenzung von Frequenzgradienten im Fall plötzlicher Leistungsungleichgewichte im Verbundsystem. Gegenwärtig wird Momentanreserve als intrinsische Eigenschaft elektromechanischer Synchrongeneratoren erbracht. Sie manifestiert sich als das mechanische Massenträgheitsmoment der rotierenden Massen in Generatoren und den mit ihnen verbundenen Antriebssträngen.

Bei zunehmender Durchdringung mit dezentraler Erzeugung und einer zeitweisen 100%igen Stromerzeugung aus EE werden diese Generatoren durch Wechselrichter-basierte Erzeugung aus dezentralen Anlagen, EE-Anlagen und Speichern sukzessive aus dem System verdrängt. Momentanreserve muss deshalb perspektivisch auch durch diese Anlagen bereitgestellt werden.<sup>40</sup> Wechselrichter mit ihren leistungselektronischen Komponenten prägen nicht intrinsisch Massenträgheit in das System ein. Die Eigenschaft muss ‚künstlich‘ in das Verhalten der Wechselrichtersteuerungen eingepreßt werden.

Während sich ein systemischer Bedarf für zusätzliche Momentanreserve oder schnelle Regelleistung in Inseln wie in Irland und Großbritannien oder der ERCOT-Regelzone (Electric Reliability Council of Texas) in Texas bereits jetzt abzeichnet, sind ähnliche Handlungserfordernisse im kontinentaleuropäischen synchronen Verbundsystem noch nicht absehbar.<sup>41</sup> Der Bedarf ist allerdings abhängig von der Definition des Ereignisses, das beherrscht werden soll. Wird als Auslegungsfall für die Bestimmung des Bedarfs an Momentanreserve der System Split zugrunde gelegt, kann regional auch hier unmittelbar ein Bedarf abgeleitet werden (dena, 2020a).

Um einen effektiven Beitrag zur Stabilisierung der Frequenz leisten zu können, muss Momentanreserve innerhalb ‚sehr kurzer‘ Zeit (Größenordnung 50 ms) erbracht werden (Leelarui & Bollen, 2015). Infolgedessen müssen die Laufzeiten von der Signalerfassung (Frequenzabweichung) bis zur tatsächlichen Einspeisung von Wirkleistung möglichst kurzgehalten werden. Da bereits für die Schätzung der aktuellen Frequenz eine gewisse Zeit erforderlich ist (Größenordnung 30 ms), müssen weitere Verzögerungen vermieden werden. Offenkundig ist, dass Lösungen aus kommerziell verfügbaren Standardkomponenten und gängigen Kommunikationsschnittstellen den Anforderungen an die Dynamik nicht gerecht werden. Es ist zu ermitteln, welche Kombination von Hardware und Software in der Praxis die notwendige Reaktionsschnelligkeit bereitstellen kann.

## AUSSERHALB VON SINTEG ERREICHTER KENNTNIS- UND ENTWICKLUNGSSTAND

Bislang wird Momentanreserve aus der Trägheit frequenzsynchron rotierender Schwungmassen erbracht. Diese ‚Systemdienstleistung‘ ergibt sich aus den physikalischen Zusammenhängen der Mechanik und Elektrotechnik als instantane Reaktion der trägen Masse auf Frequenzabweichungen. Es gab keine Notwendigkeit, Momentanreserve explizit zu spezifizieren.

Um Momentanreserve zukünftig – ggf. auch aus anderen Quellen, wie bspw. wechsellrichter-basierten EE – zur Verfügung zu stellen, muss diese Systemdienstleistung, insbesondere die

<sup>40</sup> Siehe Migrate Project, Work Package 3: Control and operation of a grid with 100% converter-based devices, [https://www.h2020-migrate.eu/\\_Resources/Persistent/8f05304df1edae2ef8f3f1e4f18142e2cba436a3/MIGRATE%20Roadshow\\_WP3.pdf](https://www.h2020-migrate.eu/_Resources/Persistent/8f05304df1edae2ef8f3f1e4f18142e2cba436a3/MIGRATE%20Roadshow_WP3.pdf)

<sup>41</sup> C. Heising et al., Need for Grid-Forming Converter-Control in Future System-Split Scenarios, Proceedings of 18th Wind Integration Workshop, Dublin, 2019

Reaktionszeit, deshalb erst einmal spezifiziert werden. Als Arbeitshypothese wurde Momentanreserve im Rahmen von SINTEG definiert als Leistungsänderung, die zu einer Verringerung der Frequenzänderungsgeschwindigkeit (Rate of Change of Frequency – RoCoF) führt.

Das Thema steht im Fokus zahlreicher Forschungsprojekte. Im Rahmen der internationalen Wind Integration Workshops wurden netzbildenden Wechselrichtern und den damit zusammenhängenden Fragen der Momentanreserve seit 2018 ganze Sessions gewidmet. Vorangetrieben wird das Thema insbesondere im Vereinigten Königreich und in Irland, von ERCOT (Systembetreiber Texas) und Hydro Quebec (Asmine, Langlois & Aubut, 2018). Aufgrund des dort bereits in der kurzen Frist erhöhten Bedarfs an sehr schneller Regelleistung entwickelt der Übertragungsnetzbetreiber National Grid bereits entsprechende Systemdienstleistungen und technologieoffene Ausschreibungen.<sup>42, 43</sup>

## **IN SINTEG AUFGEZEIGTE WEITERFÜHRENDE LÖSUNGSANSÄTZE BZW. ALTERNATIVE LÖSUNGSANSÄTZE**

In SINTEG wurde anhand praktischer Messungen am Demonstrationsmodell gezeigt, dass die Bereitstellung von Momentanreserve aus Batteriespeichern unter der angenommenen Spezifikation von Momentanreserve technisch realisierbar ist.

Die Erbringung von Momentanreserve wurde innerhalb von SINTEG nur in Wechselrichtern von Batteriespeichern demonstriert. EE-Anlagen wurden innerhalb von SINTEG nicht betrachtet. Die erforderlichen Regelalgorithmen können aber auch in den Wechselrichtern dieser Anlagen implementiert werden.

Parallel zu den Messungen an der Versuchsanlage haben simulative Untersuchungen bestätigt, dass aus Batteriespeichern bereitgestellte Momentanreserve Frequenzgradienten (ROCOF) auf Systemebene effektiv reduziert.

Die in SINTEG aufgezeigten Lösungen sind im Einzelnen:

- Im Schaufenster WindNODE (Teilarbeitspaket (TAP) 2.1, Zukunftsspeicher Energiewende) wurde eine Frequenzschätzung und Regelung (Nachbilden von Schwungmasse) von Wechselrichtern in Abstimmung mit Wechselrichterherstellern auf Hardware-Ebene umgesetzt; dadurch wird Bereitstellung von Momentanreserve (bzw. schnelle Regelleistung) aus Batteriespeichern mit ermöglicht. Die technische Realisierbarkeit wurde damit gezeigt (Reaktionszeit des Batterie-Wechselrichter-Systems auf Frequenzänderung am Netzanschlusspunkt <250ms). Zudem konnte durch Redundanzkonzepte die Ausfallsicherheit des Batteriesystems erhöht werden, womit Anforderungen einer zukünftigen SDL Momentanreserve erfüllt werden können. (WindNODE, 2020, 74f)
- Im Schaufenster NEW 4.0 (Use Case 5) wurden verschiedene Regelkonzepte (Swing Equation, virtuelle Synchronmaschine) für die Erbringung von Momentanreserve aus einem Batteriespeicher (Speicherregelkraftwerk Curslack) im Feldtest demonstriert. Bei der Implementierung wurde mit schwingungsgleichungsbasierter Regelung eine Latenz von unter einer Sekunde erreicht. Wird die Regelung unmittelbar in den Wechselrichter integriert, sind Latenzen von ca. 50 ms bei Anwendung gängiger Steuerungskonzepte realistisch. Bei externer Ansteuerung der Wechselrichter über herkömmliche Kommunikationsprotokolle steigen

<sup>42</sup> Siehe <https://www.nationalgrideso.com/balancing-services/list-all-balancing-services>, Dynamic Containment

<sup>43</sup> Siehe auch [https://www.nerc.com/comm/PC/IRPTF\\_Webinars\\_DL/2020-04\\_Webinar-FFR\\_White\\_Paper.pdf](https://www.nerc.com/comm/PC/IRPTF_Webinars_DL/2020-04_Webinar-FFR_White_Paper.pdf)

die Latenzen erheblich (im Bereich einiger 100 ms). Es zeigt sich, dass die im Versuchsaufbau erzielten Reaktionszeiten von Messsystem und Batteriesteuerung zu hoch sind, um auf dieser Basis eine ‚virtuelle Synchronmaschine‘ als eine der Möglichkeiten zur Wahrung der Momentanreserve zu implementieren (NEW 4.0 - Norddeutsche Energiewende, 2021a, S. 578–659). Dies unterstreicht, dass eine Spezifikation des gewünschten Verhaltens Voraussetzung dafür ist, zielgerichtet industrielle Lösungen zu etablieren.

Eine weltweite Marktübersicht wurde erstellt für SDL ähnlich der Momentanreserve (bspw. Fast Frequency Response, FFR im Vereinigten Königreich).

- Ebenfalls in NEW 4.0 wurde im Teilprojekt FATWAKE die Bereitstellung von Momentanreserve aus WEA untersucht. Es wurde demonstriert, dass WEA in der Lage sind, eine kurzzeitige Leistungserhöhung (Powerboost) zu produzieren. Damit können sie prinzipiell schnelle Regelleistung oder Momentanreserve bereitstellen. Nach Leistungsbereitstellung sind jedoch für mehrere Sekunden Leistungseinbußen zu verzeichnen, als Folge der notwendigen Rückführung der WEA in den ursprünglichen Betriebszustand. (NEW 4.0 - Norddeutsche Energiewende, 2021a, S. 479–577) Die Bereitstellung von zusätzlicher Leistung stellt also eine Optimierungsaufgabe dar, die nur aus systemischer Perspektive zufriedenstellend gelöst werden kann. Diese Befunde stimmen mit Projektergebnissen aus anderen Ländern wie Großbritannien, Irland oder Kanada überein.

Technologiereifegrad der Aktivitäten in NEW 4.0: TRL 4 Funktionsnachweis in Versuchsumgebung

Technologiereifegrad der Aktivitäten in WindNODE: TRL 6 – Demonstrationsanlage in anwendungsähnlicher Umgebung

## INNOVATIONSGEHALT

Die Aktivitäten in SINTEG ordnen sich in internationale Forschungsaktivitäten ein. In SINTEG konnten neue Regelungsalgorithmen entwickelt werden und die technischen Anforderungen an das Gesamtsystem weiter spezifiziert werden.

Im Ausland fanden bereits Demonstrationen der Bereitstellung von sehr schneller Regelleistung aus Batteriespeichern statt. Gleichfalls wurden Lösungen für Windkraftanlagen entwickelt und getestet (National Grid ESO, 2019b). Eine Übertragung auf Deutschland erfolgte bisher nicht, weil ein Bedarf an Momentanreserve noch nicht gegeben ist. Folgerichtig beschränkten sich entsprechende Untersuchungen in Deutschland auf ein universitäres Umfeld und die Labore der Hersteller.

## BEDINGUNGEN FÜR ÜBERTRAGBARKEIT UND SKALIERBARKEIT

Die demonstrierten Konzepte der wechselrichterbasierten Bereitstellung von Momentanreserve lassen sich auf vielfältige Anlagentypen übertragen. Neben der Ausweisung eines systemischen Bedarfs setzt dies eine Anpassung des regulatorischen Rahmens voraus, um Geschäftsmodelle auf Basis der noch zu spezifizierenden Systemdienstleistung Momentanreserve zu ermöglichen, oder die Erbringung der SDL verpflichtend in die Anschlussregelungen aufzunehmen. Momentanreserve ist dabei Gegenstand der technischen Regelsetzung auf europäischem Niveau. Die mögliche Forderung derartiger Anlageneigenschaften ist bereits in

den Netzanschlussbedingungen für Erzeuger<sup>44</sup> angelegt.

Dementsprechend stellt die regulatorische Definition einer Systemdienstleistung auch eine Voraussetzung für die Skalierung der Anwendung dar. Nur auf Basis verbindlicher Spezifikation können massenfähige Lösungen und Geschäftsmodelle entwickelt werden.

## WEITERE ENTWICKLUNGSMÖGLICHKEITEN UND HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Wichtige Einflussgrößen auf die Latenzen der Momentanreserve-Bereitstellung sind neben dem in SINTEG getesteten Schätzverfahren für die Netzfrequenz, der schnellen Ansteuerbarkeit der Batterien und dem Regelungsmodell auch die Art der Implementierung der Regelung. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine unmittelbare Integration der Regelung in die Ansteuerung der Wechselrichter, d. h. die Umgehung übergeordneter Kommunikationsprotokolle, Voraussetzung dafür ist, dass die erforderlichen kurzen Latenzen in der Praxis erzielt werden können. Technische Herausforderungen und Forschungsbedarf bestehen nicht nur bei der Länge der Laufzeiten von Mess- und Regelungsalgorithmen, sondern auch bei deren Variabilität. Die Laufzeiten sollten möglichst konstant sein, um eine stabile Regelung zu ermöglichen (NEW 4.0 - Norddeutsche Energiewende, 2021a, S. 605).

Handelsübliche Wechselrichter beziehen ihren Sollwert über Schnittstellen und zugehörige Kommunikationsprotokolle. Die damit verbundenen Laufzeiten liegen in der Größenordnung von 100 ms und mehr. Wechselrichter für die Erbringung von Momentanreserve müssen also auf derartige Schnittstellen verzichten und eine unmittelbare Weiterleitung des gemessenen Signals an die Wechselrichtersteuerung erlauben. Das bedeutet, dass für diese Anwendung dezidierte Produkte mit kurzen Signallaufzeiten erforderlich sind.

Darüber hinaus stellt sich die Frage, ob in einem System mit hohem Wechselrichteranteil eine möglichst getreue Nachbildung des Verhaltens von Synchrongeneratoren das Optimum darstellt. Möglicherweise sind andere Optionen für das Verhalten zielführender. Die Programmierung von Wechselrichtern bietet in diesem Kontext große Freiheitsgrade für die Gestaltung und Erbringung verschiedener, einander ergänzender Systemdienstleistungen. Gegebenenfalls ist auch die Spezifikation mehrerer, sich ergänzender Segmente der Momentanreserve sinnvoll. Denkbar ist bspw. die zusätzliche Spezifikation einer „schnellen Primärregelung“, neben der Momentanreserve, um die Anforderungen des Stromsystems und technische Restriktionen der Bereitstellung und wirtschaftliche Implikationen in Einklang zu bringen. Hierfür sind weitergehende Analysen auf Systemebene notwendig.

Da die verbindliche Spezifikation der Systemdienstleistung Momentanreserve europäische Abstimmungsprozesse benötigt, ist die nationale Spezifikation und Umsetzung nur in einer vorübergehenden Lernphase sinnvoll. Ein Niederschlag in den national gültigen technischen Regelwerken (TAR des VDE FNN) hilft Herstellern, die erforderlichen Anlageneigenschaften in die Produkte ‚einzuprägen‘.

---

<sup>44</sup> Network Code on Requirements for Generators (RfG NC), Commission Regulation (EU) 2016/631